5C

УДК 621.37

В.А. Санжаревский
Государственный университет информатики и искусственного интеллекта, г. Донецк, Украина
vision@email.ua

Модель взаимодействия массива микроволновых сенсоров с объектом

В статье предлагается модель взаимодействия массива микроволновых сенсоров с объектом, которая позволяет производить расчёт параметров изменения излучаемых антеннами микроволновых передатчиков радиоволн, проходящих через неоднородную среду и отражающихся от диэлектрической сухой поверхности объекта.

Введение

При разработке стенда для решения задачи дистанционного определения типа материала [1] возникает необходимость в построении модели взаимодействия массива микроволновых сенсоров (ММС) с объектом, материал которого исследуется. Для проведения экспериментов со стендом необходимо соблюдать целый ряд условий (форма и размеры объекта, состояние среды, расположение сенсоров в массиве и т.д.). Создание модели взаимодействия ММС с объектом позволит учесть все эти параметры при проведении экспериментов по определению материалов на расстоянии.

Описание модели взаимодействия радиоволн с материалом диэлектрика [1] применимо для распространения радиоволн в свободном пространстве. Свободное пространство – это однородная, безграничная, непоглощающая среда, относительная диэлектрическая и магнитная проницаемости которой равны единице. Проблема заключается в том, что подобной среды в природе не существует. Поэтому модель должна учитывать особенности распространения радиоволн в пространстве.

Целью данной работы является разработка модели, которая позволит определять основные параметры, влияющие на изменение характеристик радиоволн, излучаемых в неоднородную среду и отражённых от объекта, материал которого исследуется.

Структура модели взаимодействия ММС с объектом

Радиоволны, излучаемые микроволновым сенсором, проходят через воздушное пространство, которое может содержать в себе частички пыли и капли воды. Далее волна отражается от объекта, электрические свойства которого значительно отличаются от свойств среды, после чего отражённый сигнал проходит обратно через среду и регистрируется приёмником сенсора.Процесс взаимодействия массива микроволновых сенсоров с объектом представлен на рис. 1.



Рисунок 1 – Структура модели взаимодействия ММС с объектом

Модель включает в себя:

1. Математический аппарат для расчёта коэффициентов затухания радиоволны диапазона СВЧ в среде.

2. Математический аппарат для расчёта параметров изменения отраженной от объекта волны.
3. Модель функционирования массива микроволновых сенсоров.

Параметры затухания радиоволн в среде

В любой точке пространства, находящейся на расстоянии r от источника радиоизлучения, согласно [2], среднее значение плотности потока мощности (вектора Пойнтинга) в Вт/м^2 может быть представлено в виде:

$$\Pi = \frac{P_{изл}}{4\pi r^2}, \tag{1}$$

где $P_{изл}$ – излучаемая источником мощность.

С другой стороны, среднее значение вектора Пойнтинга в плоской волне определяется выражением:

$$\Pi = E_{д} \times H_{д}, \tag{2}$$

где $E_д$ и $H_д$ – действующие значения векторов напряженностей, соответственно электрического и магнитного полей излучаемой волны, связанные между собой соотношением:

$$H_{д} = \frac{E_{д}}{120\pi}. \tag{3}$$

Здесь знаменатель представляет собой волновое сопротивление свободного пространства. Приравнивая (1) и (2) с учетом (3) и выражая из полученного равенства $E_д$, можно записать [3]:

$$E_{д} = \frac{\sqrt{30 P_{изл}}}{r}. \tag{4}$$

Поскольку на практике антенны специально строятся таким образом, чтобы за счет перераспределения в пространстве усиливать поток электромагнитного излучения в требуемом направлении, то необходимо также учитывать коэффициент направленного действия $D_{изл}$. Таким образом, выражение (4) для реальных антенн может быть переписано в виде:

$$E_{д} = \frac{\sqrt{30 P_{изл} D_{изл}}}{r}. \tag{5}$$

С учётом направленности антенны формула вычисления амплитудного значения напряженности электрического поля сигнала (5) может быть записана:

$$E_{д} = \frac{\sqrt{30 P_{изл} D_{изл}}}{r} F(\phi,\theta), \tag{6}$$

где $F(\phi,\theta)$ – характеристика направленности антенны в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Реальная среда не является однородной по своему составу. В её составе могут присутствовать водные пары (туман, дождь) или взвешенные частицы (дым, пыль). Это обуславливает уменьшение напряженности поля через тепловые потери на движение молекул газа. В случае известной длины зоны неоднородности среды и постоянной затухания напряженности поля необходимо вычислить величину поглощения (коэффициент потерь в зоне неоднородности) по формуле:

$$\xi_{зн} = e^{-\alpha r_{зн}}{}_{зн}, \tag{7}$$

где α – постоянная затухания напряженности поля;

$r_{зн}$ – длина зоны неоднородности.

С учетом влияния неоднородной среды распространения радиоволн и подстилающей поверхности, выражение амплитудного значения напряженности поля сигнала в месте приема принимает вид:

$$E_{\partial} = \frac{\sqrt{30 P_{изл} D_{изл}}}{r} F(\phi,\theta)\xi_{зн}. \quad (8)$$

Формула (6) показывает, что напряженность поля сигнала в месте приема уменьшается пропорционально расстоянию r вследствие «потерь передачи» в свободном пространстве. В случае с неизвестным параметром затухания напряженности поля, потери напряженности поля будут определяться тангенсом угла потерь [3]:

$$tg\delta = \frac{60\sigma_{ср}\lambda}{\varepsilon_{ср}}, \quad (9)$$

где $\sigma_{ср}$ – удельная проводимость среды;

$\varepsilon_{ср}$ – диэлектрическая проницаемость среды;

λ – длина волны СВЧ диапазона.

Распространение СВЧ волн в атмосфере зависит от влажности, температуры и атмосферного давления среды.

Рассматривая изотропную среду, состоящую из смеси сухого воздуха и паров воды, можно выразить ее относительную диэлектрическую проницаемость в виде:

$$\varepsilon_{ср} = 1 + \kappa_{э}, \quad (10)$$

где $\kappa_{э}$ – диэлектрическая восприимчивость среды, состоящая из двух слагаемых – диэлектрической восприимчивости сухого воздуха и диэлектрической восприимчивости паров воды. Первое слагаемое характеризует токи смещения, а второе – токи поляризации.

Поскольку механизмы поляризации молекул газа, не имеющих дипольного момента, и паров воды, имеющих дипольный момент под воздействием вектора напряженности электрического поля радиоволны, различны, то, основываясь на экспериментальных измерениях указанных диэлектрических восприимчивостей, выражение для относительной диэлектрической проницаемости среды записывается в виде [2]:

$$\varepsilon_{ср} = 1 + \frac{1{,}552\times10^{-6}}{T}\left(p + \frac{4810e}{T}\right), \quad (11)$$

где p – атмосферное давление в Па;

e – давление водяных паров в Па;

T – абсолютная температура.

Параметры изменения отражённых радиоволн

По аналогии со световыми волнами СВЧ распространяются прямолинейно и огибают лишь предметы, имеющие геометрические размеры, соизмеримые с длиной волны. Например, при излучении микроволнового сенсора, работающего на частоте 10 ГГц, для отражения волн от объекта (следовательно, фиксирования объекта) грань объекта, перпендикулярная направлению волны должна быть больше 3 см.

Огибание препятствий радиоволнами – дифракция сказывается тем сильнее, чем больше длина волны и чем меньше размеры препятствия. На границе двух сред происходит отражение радиоволн по закону оптики – угол падения равен углу отражения. Частичное преломление радиоволн также происходит по законам оптики.

Как и в случае с затуханием волны, излучаемой сенсором, в среде, изменение отражённых от объектов волн определяется при помощи значения тангенса угла потерь – отношение мнимой ε_{im} и вещественной части ε_{re} комплексной диэлектрической проницаемости [4]:

$$tg(\delta) = \frac{\varepsilon_{im}}{\varepsilon_{re}}. \quad (12)$$

Угол диэлектрических потерь представляет собой разность фаз между векторами электрического поля и электрической индукции, которая обусловлена потерями энергии в диэлектрике. Он может быть вычислен по формуле:

$$д = \frac{1}{б} = \frac{1}{щ\sqrt{м_м е_м}\left\{\frac{1}{2}\left[\sqrt{1+\left(\frac{у_м}{ще_м}\right)^2}-1\right]\right\}^{1/2}}, \qquad (13)$$

где $\sigma_м$ – удельная проводимость материала;

$\mu_м$ – магнитная проницаемость материала;

$\varepsilon_м$ – диэлектрическая проницаемость материала;

ω – частота колебаний волны.

Диэлектрическая проницаемость сильно зависит от влагосодержания материалов. Измерение параметров влагосодержания в разрабатываемой системе осуществить дистанционно не возможно. Поэтому в описании модели рассмотрены только формулы для расчёта параметров сухих диэлектриков.

Модель функционирования массива микроволновых сенсоров

В соответствии с выражениями (1) – (13) в системе моделирования MathCAD построена математическая модель расчёта таких параметров изменения радиоволн, как плотность потока мощности, потери передачи, принятая мощность сигнала. Модель применена на реальной системе, структурная схема которой представлена на рис. 2.

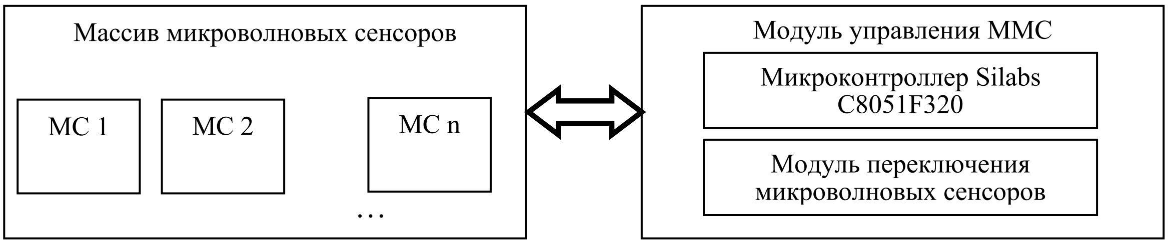


Рисунок 2 – Структурная схема массива микроволновых сенсоров

Массив МС состоит из n сенсоров и модуля включения\отключения активного сенсора. Управляющий сигнал на включение\отключение сенсора поступает с выхода микроконтроллера по истечению времени таймера. Далее сигнал с опрашиваемого сенсора поступает на вход аналого-цифрового преобразователя, после чего происходит перезапуск таймера и аналогичным образом осуществляется опрос следующего сенсора. Таким образом, в один момент времени активен только один микроволновый сенсор и это позволяет избавиться от явления интерференции волн.

Мощность излучения передающего модуля сенсора обычно не превышает 2 мВт. Для определения мощности на входе приемной антенны сенсора следует плотность потока мощности, созданную передающей антенной в месте приема, умножить на эффективную площадь раскрыва приемной антенны. Эффективная площадь раскрыва приемной антенны всегда меньше геометрической площади и выражается в м^2 в виде:

$$S_{эфф} = D_{пр}\frac{\lambda^2}{4}, \qquad (14)$$

где $D_{пр}$ – коэффициент направленного действия приемной антенны;

λ – длина волны СВЧ диапазона.

Таким образом, принятая мощность может быть вычислена по формуле:

$$P_{пр} = П_{изл}S_{эфф}, \qquad (15)$$

где $П_{изл}$ – плотность потока мощности, создаваемого реальной излучающей антенной у раскрыва приемной антенны:

$$П_{изл} = \frac{P_{изл}D_{изл}}{4\pi r^2}\gamma_{нп}, \qquad (16)$$

где $\gamma_{нп}$ – коэффициент нелинейности, которая возникает вследствие нелинейности характеристик модуляционного тракта передатчика.

В общем виде, потери передачи L определяются по формуле:

$$L = \frac{P_{пр}}{P_{изл}}. \tag{17}$$

Предлагаемая формула (18) позволит вычислить среднее значение плотности потока мощности в точке соприкосновения радиоволн, прошедших через среду, с объектом, расположенным на расстоянии r от ММС:

$$П = \frac{P_{изл} 60\sigma_{ср}\lambda}{4\pi r^2 \varepsilon_{ср}} \xi_{зн}, \tag{18}$$

где $\xi_{зн}$ – коэффициент неоднородности среды.

Исходя из формул (1) – (16) принятая мощность сигнала, с учётом изменений радиоволны, проходящей через среду и отраженной от объекта, может быть вычислена по формуле:

$$P_{пр} = 22D_{пр}\lambda^2 \times \frac{P_{изл}}{\pi r^2} \times \frac{\sigma_{ср}^{\;2}}{\varepsilon_{ср}^{\;2}} \times tg\left(\frac{1}{щ\sqrt{м_м е_м}\left\{ \frac{1}{2}\left[\sqrt{1+\left(\frac{у_м}{ще_м}\right)^2} - 1 \right] \right\}^{1/2}} \right) \times \xi_{ср} \times \xi_м, \tag{19}$$

где $\xi_м$ – коэффициент нелинейной проводимости материала.

Выводы

Разработанная модель позволит получать параметры затухания амплитуды напряженности электрического поля сигнала, мощности излучаемого и принимаемого сигнала сенсором в диапазоне СВЧ, при помощи программного комплекса MathCAD, что обеспечит точность в вычислении параметров диэлектрической проницаемости для определения материала объектов.

Следует учесть, что для применения математического аппарата расчётов параметров среды, необходимо использование дополнительных модулей, которые позволят определять влажность среды, степень запылённости, расстояние к исследуемому объекту и т.д.

Литература

1. Санжаревский В.А.. Разработка стенда для решения задачи дистанционного определения типа материала / В.А. Санжаревский, И.В. Дорохов // Искусственный интеллект. – 2009. – № 4. – С. 297-301.
2. Грудинская Г.П. Распространение радиоволн : учеб. пособие / Грудинская Г.П. – М. : Высшая школа, 1975. – 280 с.
3. Родос Л.Я. Электродинамика и распространение радиоволн (распространение радиоволн): учеб-метод. комплекс (учебное пособие) / Родос Л.Я. – СПб. : Изд-во СЗТУ, 2007. – 90 с.
4. Мищенко С.В.. Проектирование радиоволновых приборов неразрушающего контроля : учеб. пособие / С.В. Мищенко, Н.А. Малков. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. – 128 с.

В.О. Санжаревський

Модель взаємодії масиву мікрохвильових сенсорів з об'єктом

У статті пропонується модель взаємодії масиву мікрохвильових сенсорів з об'єктом, яка дозволяє проводити розрахунок параметрів зміни випромінюваних антенами мікрохвильових передавачів радіохвиль, що проходять через неоднорідну середу і відбиваються від поверхні об'єкта з діелектричного сухого матеріалу.

V.A. Sanzharevskij

Model of Interaction between the Array of Microwave Sensors to the Object

The article proposesthe model of interaction between the array of microwave, which allows the calculation of the parameters changes the radiated microwave antennas, transmitters of radio waves passing through an inhomogeneous medium and is reflected from dielectric dry surface of the object.

Статья поступила в редакцию 11.06.2010.